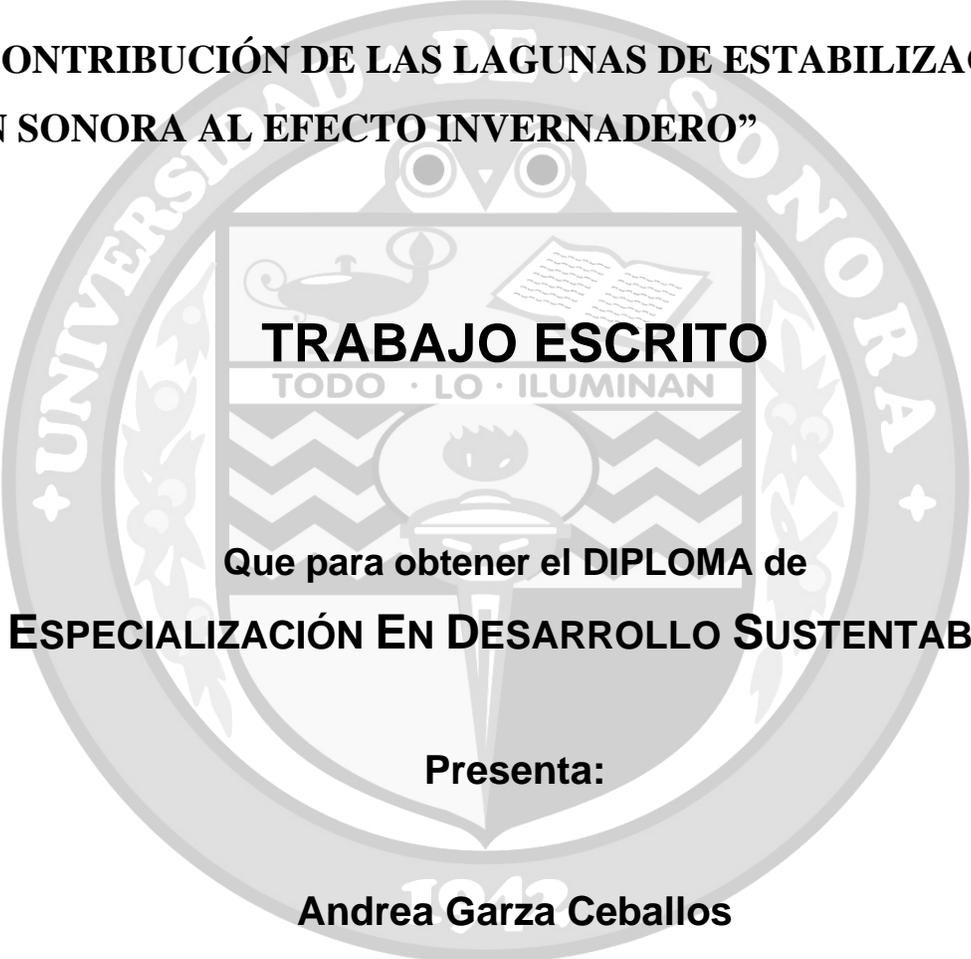


UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**“CONTRIBUCIÓN DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN
EN SONORA AL EFECTO INVERNADERO”**

The seal of the University of Sonora is a large, circular emblem in the background. It features a central shield with a lamp of knowledge, an open book, and a sun. The shield is surrounded by a wreath and the text "UNIVERSIDAD DE SONORA" and "1943".

TRABAJO ESCRITO

TODO · LO · ILUMINAN

**Que para obtener el DIPLOMA de
ESPECIALIZACIÓN EN DESARROLLO SUSTENTABLE**

Presenta:

Andrea Garza Ceballos

Director de Tesina:

Dr. Héctor Manuel Guzmán Grijalva

Co-Director de Tesina:

M.C. Gilberto García Navarrete

HERMOSILLO, SONORA

JUNIO 2021

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



COORDINACIÓN DE PROGRAMA DEL POSGRADO EN SUSTENTABILIDAD
ESPECIALIZACIÓN EN DESARROLLO SUSTENTABLE / MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD

Hermosillo, Sonora, a 18 de junio del 2021

Dr. Javier Esquer Peralta
Coordinador del Posgrado en Sustentabilidad
P R E S E N T E . –

Por este conducto, hago de su conocimiento que estoy de acuerdo que se realice el siguiente examen de posgrado:

Programa:	Maestría en Sustentabilidad:	Especialidad en Desarrollo Sustentable:	X
Alumno (a):	ANDREA GARZA CEBALLOS		
Expediente:	211200916		
Fecha:	18 DE JUNIO DEL 2021		
Hora:	16:00 HRS.		
Edificio y Aula:	PLATAFORMA VIRTUAL		

Relación de Jurados:

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE:	DR. HÉCTOR MANUEL GUZMÁN GRIJALVA	<i>Hector M. Guzmán G</i>
SECRETARIO:	DRA. JUANA ALVARADO IBARRA	<i>Juana Alvarado Ibarra</i>
VOCAL:	DRA. CLARA ROSALÍA ÁLVAREZ CHÁVEZ	<i>Clara Rosalía Álvarez</i>
SUPLENTE:	MS. DAVID SLIM ZEPEDA QUINTANA	<i>David Slim Zepeda Quintana</i>

A T E N T A M E N T E
MIEMBROS DEL JURADO



Página dejada intencionalmente en blanco

RESUMEN

Las lagunas de estabilización aportan metano (CH_4) al medio ambiente; el CH_4 tiene un potencial de calentamiento 28 veces mayor que el CO_2 , por lo que su contribución al incremento del calentamiento global es de gran importancia. La magnitud de las emisiones de metano en las lagunas de estabilización en Sonora se estimó utilizando las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), mediante el nivel 1 de la metodología propuesta por el organismo, y también con un nivel compuesto entre los niveles 1 y 2. Además, se calcularon los flujos por unidad de área de las lagunas, dividiendo la magnitud de la emisión obtenida entre su área. Las emisiones anuales de metano de las lagunas de estabilización en Sonora ascienden a 7,200,510.19 kg. Sonora aporta 198,430 toneladas de CO_2e con sus lagunas de estabilización, esto representa el 0.13% de las emisiones de metano de México en CO_2e , y equivale aproximadamente al 8.86% de las emisiones originadas por la ganadería en un año en Sonora. Si las lagunas se mantuvieran en un buen estado esto podría reducirse a 6,420,281.53 kg de metano al año. El nivel 1 de la metodología del IPCC, con los valores sugeridos por defecto, subestima los valores de emisión reales. De acuerdo con los valores de flujo por unidad de área obtenidos, la laguna de estabilización de Empalme y la laguna de estabilización de Moctezuma son las que arrojan los valores más altos.

ABSTRACT

Stabilization ponds release methane (CH₄) to the environment; CH₄ has a warming potential 28 times greater than CO₂, so its contribution to the increase in global warming is of great importance. The magnitude of methane emissions from the stabilization ponds in Sonora was estimated using the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); procedures employed were level 1 methodology proposed by the agency, and also a composite level with elements from levels 1 and 2. The fluxes per unit area of the ponds were calculated by dividing the magnitude of the emission obtained by their areas. Annual methane emissions from the stabilization ponds in Sonora amount to 7,200,510.19 kg. Sonora contributes 198,430 tons of CO₂e with its stabilization ponds; this represents 0.13% of Mexico's methane emissions as CO₂e, and is equivalent to approximately 8.86% of the emissions originated by livestock in one year in Sonora. If the lagoons were maintained in good condition this could be reduced to 6,420,281.53 kg of methane per year. Tier 1 of the IPCC methodology, with the suggested default values, underestimates the actual emission values. According to the flux values per unit area obtained, the Empalme stabilization pond and the Montezuma stabilization pond have the highest values.

ÍNDICE

Índice de Contenido.

<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
I. Introducción	1
II. Objetivo Estratégico	2
III. Objetivos Específicos	2
IV. Análisis Literario	3
V. Metodología	12
VI. Resultados	18
VII. Discusión	27
VIII. Conclusiones	29
IX. Recomendaciones	29
X. Referencias	30

Índice de Tablas

<u>Tabla</u>	<u>Descripción</u>	<u>Página</u>
1	Valores de DBO5 estimados para las aguas residuales domésticas por regiones y países seleccionados.	13
2	Valores de MCF por defecto para las aguas residuales domésticas.	15
3	Valores sugeridos para la fracción de la población (U) y el grado de utilización de la vía del tratamiento o eliminación o del método por grupo de ingresos (Tij) para los países seleccionados.	16
4	Emisiones de metano obtenidos con metodología Nivel 1 y metodología compuesta Nivel 1 y 2	20
5	Flujos por unidad de área y emisiones de metano obtenidos con metodología Nivel 1 y metodología compuesta Nivel 1 y 2.	24

I. INTRODUCCIÓN

Las lagunas de estabilización aportan con metano (CH_4) al ambiente, el metano absorbe más energía por unidad de área que el dióxido de carbono (CO_2), tiene un potencial de calentamiento 28 veces mayor, por lo que su contribución al incremento del calentamiento global es de gran importancia. El tratamiento y eliminación de aguas residuales aporta el 11.1% de las emisiones de metano. El objetivo de desarrollo sostenible (ODS) número 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles” busca reducir el impacto negativo per cápita de las ciudades mejorando la calidad del aire y una mejor gestión de desechos municipales, el ODS número 13 “Acción por el Clima” nos invita a adoptar medidas que permitan responder a la emergencia climática actual. Mitigar los gases de efecto invernadero es parte fundamental del ODS 13 y parte del ODS 11 y para poder mitigar se necesita conocer con lo que se aporta he ahí la importancia del trabajo.

Se utilizaron las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) para calcular la magnitud de las emisiones de CH_4 de las 93 lagunas de estabilización en Sonora, se calculó con el nivel 1 de la metodología, así como también con un nivel compuesto entre nivel 1 y nivel 2, ya que se contaban con valores específicos recomendados al país, así como también se utilizaron los recomendados por el IPCC. También se calcularon los Flujos por unidad de área de las lagunas, dividiendo la magnitud obtenida con el área de la laguna.

Las emisiones anuales de metano de las lagunas de estabilización en Sonora ascienden a 7,200,510.19 kg. Sonora aporta 198,430 toneladas de CO_2e con sus lagunas de estabilización, esto representa el 0.13% de las emisiones de metano de todo el país en millones de toneladas de CO_2e . Estas emisiones equivalen aproximadamente al 8.86% de las emisiones originadas por la ganadería en un año. Si las lagunas se mantuvieran en un buen estado esto podría bajar a 6,420,281.53 kg de metano al año. El nivel 1 de la metodología del IPCC con los valores por defecto sugeridos subestima los valores reales de emisión. De acuerdo a los valores obtenidos de flujo por unidad de área la laguna de estabilización de Empalme, Sonora y la laguna de estabilización de Moctezuma, Sonora son las que arrojan los valores más altos.

II. OBJETIVO ESTRATEGICO

Estimar las aportaciones al efecto invernadero de las emisiones de metano (CH₄) de las lagunas de estabilización en el estado de Sonora.

III. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Elaborar un análisis literario del estado del arte acerca de las emisiones de metano y otros gases de efecto invernadero generadas en lagunas de estabilización y otros sistemas de tratamiento de agua, de métodos utilizados para la cuantificación de sus magnitudes, de su impacto potencial al incremento del efecto invernadero y tópicos relacionados.

Clasificar información disponible en organismos oficiales sobre el valor de los parámetros relevantes para la estimación de emisiones de metano de las lagunas de estabilización en Sonora.

Identificar la magnitud de las emisiones de metano originadas por lagunas de estabilización en Sonora.

IV. ANÁLISIS LITERARIO

IV.1 Gases de efecto invernadero y cambio climático

En la actualidad se considera que el cambio climático podría estar contribuyendo a que con mayor frecuencia ocurran inundaciones, sequías y a que se produzca el deshielo de los casquetes polares, el aumento del nivel del mar, la expansión de zonas climáticas áridas y la contracción de las polares (IPCC, 2019b). El cambio climático es causado por un exceso de gases de efecto invernadero en la atmósfera, este efecto ha ido aumentando desde la revolución industrial, por lo que las concentraciones atmosféricas de óxido nitroso (N_2O), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) se han elevado (Mendoza, C. y Jiménez, G. 2017).

Si bien el efecto invernadero es un proceso natural que permite que haya vida en la tierra, y se origina debido a la absorción atmosférica de la radiación térmica emitida por el sol, la tierra y los océanos y su posterior irradiación hacia la superficie de la tierra, incrementando su temperatura (Mendoza, C. y Jiménez, G. 2017). Los principales gases de efecto invernadero son, el dióxido de carbono (CO_2), el Óxido Nitroso (N_2O), el Metano (CH_4) y el Ozono (O_3), también hay otros como el Hexafluoruro de azufre (SF_6) y los Hidrofluorurocarbonos (HFC), el CH_4 y el CO_2 son catalogados como los más importantes (OMM, 2019). Las emisiones de ambos gases aumentan año con año, dándose el caso de que el metano constituye alrededor del 20 por ciento de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, estimándose en el 2013 que las emisiones globales de metano antropogénico alcanzarían las 9,390 millones de toneladas métricas de CO_2 equivalente (MtCO_2e) en el 2020 (EPA 2013).

El metano absorbe más energía por unidad de masa que el dióxido de carbono, posee un potencial de calentamiento 28 veces mayor que el del dióxido de carbono, por lo que su contribución al incremento del calentamiento global es de gran importancia. (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018) (IPCC, 2013). El 21% de las emisiones de MtCO_2e en México corresponden al metano (INECC y Semarnat, 2015). El MtCO_2e es un parámetro utilizado para comparar las emisiones de distintos gases de efecto de invernadero de acuerdo con su potencial particular de calentamiento global; se expresa en millones de toneladas (Mt) de CO_2 equivalente y su valor se obtiene en cada

caso al multiplicar las toneladas de gas por su potencial de calentamiento global asociado (Real academia de Ingeniería, 2021).

Si bien el metano no afecta directamente la salud humana, es uno de los principales precursores del ozono troposférico; considerándose que es responsable de la mitad del incremento que este último ha experimentado en el planeta (CCAC, 2014). El ozono (O_3) troposférico es un importante gas de vida corta que, en condiciones normales, en la estratósfera, protege a la tierra de la radiación ultravioleta, pero en la tropósfera actúa como un potente gas de efecto invernadero y un contaminante del aire. Se ha estimado que el ozono troposférico es causante de 150,000 muertes anuales en el planeta, así como también de daños a la salud de muchas personas (Lim, S. et al. 2012).

Es importante mencionar que si bien las estrategias climáticas anteriormente estaban enfocadas principalmente en reducir las emisiones de CO_2 y otros gases de efecto invernadero; los últimos años se ha demostrado que la reducción de las emisiones de agentes climáticos forzadores de corta vida durante algunos años o meses puede producir un impacto favorable en la temperatura global, el cual sería perceptible en unas cuantas décadas, a diferencia de una disminución de las emisiones de CO_2 , en cuyo caso sería notorio en un periodo de tiempo mucho mayor (CCAC, 2014). Los agentes climáticos forzadores de vida corta son agentes atmosféricos que contribuyen al cambio climático, se llaman de vida corta ya que, como su nombre lo indica, se presentan en un lapso relativamente corto en la atmosfera; este periodo puede ser de días, en el caso del carbono negro, semanas para el ozono troposférico, o décadas para el metano (Molina et al., 2009).

IV.2 Fuentes de Metano y su cuantificación

Aproximadamente el 54% de las emisiones totales de metano provienen de la agricultura, minas de carbón, vertederos, sistemas de gas natural y petróleo, y aguas residuales (EPA, 2013). En 2010 las emisiones de metano en México fueron de 7,938.9 Gg, lo que representa un incremento de casi el 60% con respecto a 1990, siendo los desechos y los sectores energético y ganadero los principales generadores de emisiones de metano; las emisiones fugitivas por petróleo y gas natural contribuyen con un 45.9%, la fermentación entérica con un 22.8%, la eliminación de desechos sólidos con un 13.3%, el tratamiento y

eliminación de aguas residuales con un 11.1% y las emisiones fugitivas por combustibles sólidos con un 3.9% (INECC y Semarnat, 2015).

Lograr la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero es el eje central para el objetivo número 13, acción por el clima, de los Objetivos del Desarrollo Sustentable (ODS) de las Naciones Unidas se indica que es necesario adoptar medidas que permitan responder a la emergencia climática actual (Naciones Unidas, 2016). de este objetivo y del acuerdo de París (Naciones Unidas, 2015). Además, el ODS número 11 de la agenda 2030, referente a ciudades y comunidades sustentables, se enfoca, en el punto 11.6, en la importancia de “reducir el impacto negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de desechos municipales y de otros tipos” (Naciones Unidas, 2016).

Los esfuerzos actuales de los países latinoamericanos se enfocan en evaluar las emisiones de metano y en cuantificar los inventarios nacionales más que en su mitigación (Mohammed, B. et al. 2017). Hay emisiones que no son tomadas en cuenta por la pequeña cantidad en que se generan o por la complejidad de su atribución; esto ocasiona que se subestime su monto, se cree incertidumbre, y se ponga de manifiesto la necesidad de realizar una mayor investigación para lograr su mejor caracterización (National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2018). Las proyecciones climáticas para los próximos años y décadas resultan ser particularmente susceptibles a variaciones en los niveles de las emisiones provenientes de agentes climáticos forzadores de corta vida, tales como los aerosoles y el metano (IPCC, 2013).

Reducir y aprovechar las emisiones del gas metano, contribuye al cumplimiento de metas de mitigación de gases de efecto invernadero señaladas por el Acuerdo de París, y que buscan reducir las emisiones de metano entre un 40 y 45% para el 2021 (SEMARNAT, 2018). Como ya se vio, el tratamiento y eliminación de aguas residuales aporta un porcentaje importante de metano (INECC y Semarnat, 2015). De hecho, se ha reportado que se descarga una gran cantidad de agua residual sin tratar en México, lo cual implica mayores emisiones de metano que no se encuentran incluidas en el inventario nacional de emisiones (González-Valencia et, al., 2014).

El tipo y grado de tratamiento de las aguas residuales varía de un país a otro, así como entre zonas urbanas y rurales (Organización Mundial de la Salud, UN Water, ONU Habitat 2018). Estos diferentes tipos de tratamiento tienen diferente potencial de emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2019a). Los tratamientos de aguas residuales más comunes en países desarrollados son tratamientos aeróbicos centralizados, tales como plantas de tratamiento y lagunas para aguas domésticas e industriales; algunas industrias pretratan sus aguas para evitar sanciones, las aguas domésticas también pueden ser tratadas *in situ* en sistemas sépticos, los cuales consisten de un tanque anaeróbico subterráneo que trata el agua; sin embargo, en otros países se continúa desechando aguas residuales sin tratar a cuerpos de agua naturales (IPCC, 2019a).

En México los principales procesos de tratamiento de aguas residuales utilizados son lodos activados, lagunas de estabilización y lagunas aireadas (CONAGUA, 2018). La mayoría de las plantas de tratamiento activas en Sonora utilizan métodos de tratamiento extensivos; éstos son aquellos en los que el tratamiento principal es realizado por la acción de componentes del medio natural (Mamane y Lester, 2015) y en los que el efecto depurador se debe a la vegetación, el suelo o los microorganismos sin intervención de agentes artificiales (CONAGUA, 2016).

Una acción de mitigación importante consiste en aprovechar el metano que se produce en algunos procesos, como la descomposición anaerobia de desechos sólidos municipales o en los tratamientos de aguas residuales, para la generación de electricidad (Molina et al., 2009). De hecho, se han analizado escenarios que muestran que el tratamiento de aguas municipales puede representar una oportunidad de reducir los gases de efecto invernadero en países en desarrollo; en México las emisiones podrían reducirse hasta en un 34 % (Noyola, 2016).

IV.3 Lagunas de estabilización y la producción de metano

Los estanques o lagunas de estabilización son de uso bastante común en los países en desarrollo, esto es debido a su operación sencilla y de bajo costo (Konnerup et, al., 2009); frecuentemente estas lagunas suelen ser empleadas en comunidades pequeñas ubicadas en zonas rurales (Steinmann, Weinhart y Melzer. 2003). Cuando las aguas residuales son descargadas en estas lagunas de estabilización, estas realizan un proceso de

estabilización natural en el que ocurren fenómenos físicos, químicos y biológicos, los cuales permiten que se logre la autodepuración de las aguas tratadas (Burga, 2004). Este procedimiento permite eliminar materia orgánica, nutrientes y microorganismos patógenos de las aguas residuales comunitarias con costos mínimos de tratamiento (Rodríguez J. 2008).

El tipo de microorganismos que se encuentran suspendidos en los estanques son los que permiten su autodepuración. Las bacterias encargadas de la degradación de la materia orgánica pertenecen a los géneros *Achromobacter*, *Flavobacteria*, *Mycobacteria*, *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Nocardia*, *Pseudomonas* y *Zoogloea*, también hay presencia de algas debido al contenido de nitrógeno, fósforo y al dióxido de carbono liberado por las bacterias; las algas son fuente de oxígeno para las bacterias (CONAGUA, 2007). Existen además protozoarios y rotíferos que se alimentan de las bacterias, mejorando la calidad del agua (Cortés, Treviño y Tomasini, 2017).

Las lagunas de estabilización son fuente de emisiones de metano; en México hay pocos trabajos de investigación al respecto (Paredes, M. G., 2016). La producción de metano en aguas residuales se da de la siguiente manera; éstas son canalizadas a sistemas sépticos a través del alcantarillado y llegan a instalaciones de tratamiento en donde las moléculas suspendidas se transforman en moléculas más pequeñas y simples, como proteínas, carbohidratos y lípidos, las cuales son hidrolizadas a aminoácidos, azúcares y son convertidos en subproductos o directamente en ácido acético; estas, en condiciones anaeróbicas, se transforman en metano (SEMARNAT y CONAGUA, 2016).

La producción de metano en las lagunas se da también por la acumulación de sedimento o lodos biológicos generados por la descomposición de la materia orgánica, ésta acumulación reduce el volumen útil de las lagunas, provoca arrastre de sólidos en suspensión en el efluente final, reduce la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento, esto origina costos asociados al retiro y disposición de los sedimentos, y en caso de no hacerse ocasiona que se genere más cantidad de metano (Conil, 2000). El factor principal para determinar la producción de metano es la fracción orgánica degradable, comúnmente expresada como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) (IPCC, 2019a).

El metano proveniente de aguas residuales contribuye en un 2% a las emisiones de metano antropogénico, el metano también se produce por emisiones fugitivas de los digestores anaeróbicos, así como por las condiciones anaerobias que se desarrollan en los biosólidos después de su disposición en tierra (EPA, 2017). Las emisiones de metano que son pertenecientes a las lagunas de estabilización tienen la característica de ser dispersas y difíciles de cuantificar; pero se sabe que tienden a incrementar a medida que aumenta el tiempo de operación de las lagunas (IDEAM, 2009). Aun así, la utilización de lagunas de estabilización como método de remoción sigue siendo un método bastante eficiente para el tratamiento de aguas residuales por ser esencialmente sencillo y no requerir de energía externa para su funcionamiento (Matamoros, et al. 2016).

IV.4 Métodos de medición de metano en aguas residuales

México enfrenta importantes retos en lo que concierne al manejo de aguas residuales; entre los cuales se destaca la reducción de la presión sobre los recursos hídricos, la protección a la salud de la población en general y de los ecosistemas, también el fortalecimiento de la capacidad de adaptación al cambio climático, y la mitigación o eliminación de las emisiones de metano, las cuales pueden derivarse de los procesos de tratamiento (Molina et al., 2009). En Sonora los datos sobre la operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como también la calidad de sus efluentes son muy limitados; la evaluación directa de los niveles de eficiencia en las plantas de tratamiento y el impacto sobre el medio ambiente que éstas tienen se desconoce (Mamane y Lester. 2015).

La cuantificación del metano atmosférico y el volumen de las emisiones que son liberadas es esencial para tomar decisiones informadas, las cuales puedan tener repercusiones en el clima, la economía, y la salud y la seguridad humanas (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018). Existen varias técnicas para la medición de los gases de efecto invernadero, tales como las cámaras de respiración, el trazador hexafluoruro de azufre, y las técnicas micrométricas; estas permiten un análisis de los gases de efecto Invernadero de una manera continua, pero no suelen ser usadas comúnmente para las mediciones de metano y dióxido de carbono en lagunas de estabilización o incluso en plantas de tratamiento en general (Rodríguez et, al. 2019).

Para medir la magnitud de las emisiones metano, y de otros tipos de gases como dióxido de carbono en campo en plantas de tratamiento de agua, es común utilizar analizadores de biogas portables; de esta manera es posible conocer el volumen de las emisiones con una precisión de 0.5% (Paredes, 2016). Sin embargo, la estimación de las emisiones de metano en la actualidad exhibe un alto grado de incertidumbre (El-Fadel y Massoud, 2001). Una de las metodologías usadas para estimar las emisiones de metano generadas por los tratamientos de aguas residuales es la propuesta por el “Panel intergubernamental sobre Cambio climático” (IPCC por sus siglas en inglés). El IPCC es el organismo de las Naciones Unidas que evalúa y elabora políticas sobre el cambio climático; realiza evaluaciones regulares sobre sus efectos y potencial de riesgos, y presenta planes de adaptación y opciones de mitigación (IPCC, 2021).

Existen otras metodologías utilizadas con este propósito, como lo es el uso de cámaras cerradas para medir el flujo del metano, que requieren un gran número de puntos de muestreo; además se ha buscado usar la relación entre los flujos de metano y la temperatura para desarrollar otro tipo de procedimientos (Ishigaki et, al., 2005). La realidad es que el principal protocolo utilizado para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente para el metano, son las pautas del IPCC 2006 (Disksha y Kumar, 2012). Tan es así que el protocolo IPCC es el método convencional utilizado para emisiones de metano (Bo-Feng et al, 2013), empleado también por la EPA (2013).

Los inventarios del IPCC se basan en ciertos conceptos fundamentales que aseguran la comprensión común y permiten que los inventarios de diferentes países puedan compararse; estos inventarios deben incluir los montos de gases de efecto invernadero producidos y consumidos que tengan lugar en el territorio, estas estimaciones están divididas en cinco categorías, a saber, energía, procesos industriales, agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, desperdicio y otros (IPCC, 2006). El tratamiento de aguas residuales se ubica en la categoría de desperdicio, en la subcategoría de tratamiento y descarga de aguas residuales. Los métodos de estimación consideran la magnitud de la actividad humana, a la cual se le denomina “datos de la actividad” y varios coeficientes que cuantifican las emisiones de las diferentes actividades unitarias y que se denominan “factores de emisión” (IPCC, 2019a).

IV.5 Metodología del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC)

Los métodos utilizados por el IPCC se definen en niveles en relación a los grados de complejidad metodológica; siendo el nivel 1 el básico en donde se aplican valores por defecto para los factores de emisión y parámetros de la actividad, el nivel 2 mantiene la misma metodología pero permite incorporar in factor de emisión específico del país y de datos de actividad específicos del país y un nivel 3 es un método más avanzado y se basa en datos específicos de cada planta de tratamiento evaluada, existen árboles de decisión que ayudan a seleccionar el nivel adecuado de la metodología que es conveniente aplicar en la estimación que se haga (IPCC,2006). Para estimar los inventarios de gases de efecto invernadero, en México generalmente se suele emplear el Nivel 1 de la metodología propuesta por el IPCC (Paredes, M. G., 2016).

Los principales factores utilizados en la metodología IPCC de nivel 1 para la cuantificación de las emisiones de metano son la población, la cantidad estimada de carbono orgánico degradable, los niveles de DBO y de DQO - estos dos últimos deben medirse; a mayores magnitudes de los valores de DBO y DQO, mayor será la producción de metano - la temperatura y el tipo de sistema de tratamiento también son importantes, ya que la producción de metano aumenta al incrementarse la temperatura y es improbable que ocurra por debajo de los 15 °C (IPCC 2006). Con la finalidad de estimar la magnitud de las emisiones de metano en países con una escasa disponibilidad de información, generalmente se utilizan valores estándares para el factor de emisión y para los parámetros de la actividad antropogénica en la zona en donde se ubican las instalaciones de tratamiento analizadas (IPCC, 2009).

Para calcular la mayoría de las emisiones se multiplican un factor de emisión, los datos de la actividad y parámetros estadísticos; el método Monte Carlo es el método más usado para agregar las incertidumbres en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (Paredes, 2016). Detalladamente el Método de Monte Carlo, funciona para la propagación de la incertidumbre, tomando la distribución de la incertidumbre para cada variable y una ecuación para el cálculo de una cantidad deseada, se calcula la cantidad deseada y aleatoriamente se extraen las distribuciones de incertidumbre especificadas de las variables de entrada; este cálculo se repite muchas veces con nuevos esquemas

aleatorios cada vez y la distribución de la incertidumbre resultante del valor calculado se obtiene directamente de los numerosos ensayos aleatorios. (Albert, 2020).

Al utilizar este método para calcular la incertidumbre en la metodología del IPCC se seleccionan valores aleatorios de factores de emisión y datos de actividad; una vez que se calculan los valores de las emisiones correspondientes, este procedimiento se repite muchas veces y el resultado comprende la función de probabilidad de la emisión en general (Paredes, 2016). Esto es importante debido a que habitualmente en todas las estimaciones de gases de efecto invernadero, no solo en el cálculo de emisiones de metano se manejan niveles de incertidumbre, comúnmente en la entrada de los datos estadísticos y así también en el factor de emisión que es otorgado por defecto (Szemesova y Gera, 2010).

En general todos los métodos para calcular emisiones de metano, ya sea este teórico o experimental está asociado con un alto grado de variabilidad y de incertidumbre (El-Fadel y Massoud, 2001). En virtud de lo anterior, los resultados sobre inventarios de emisiones de los países suelen ser evaluaciones aproximadas (Paredes, et al., 2015). En este contexto, Paredes, M.G. (2016) en su tesis doctoral, recomienda utilizar 0.45 CH₄/kg DBO como factor de emisión para lagunas de estabilización que funcionan conforme a lo que se consideran buenas prácticas de operación, y 0.60 kg CH₄/kg DBO para lagunas de estabilización con una operación pobre (Noyola, 2016). Estos factores de emisión para las lagunas de estabilización fueron calculados en sitio, y modelados con función de densidad de probabilidad, tomaron la media para los factores con un intervalo de confianza del 95% (Paredes, 2016).

V. METODOLOGIA

Tipo de estudio

Cuantitativo

Diseño metodológico

Descriptivo

Los valores correspondientes a los parámetros utilizados para estimar las magnitudes de las emisiones de metano fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2019). Además, dicha institución proveyó un listado de las lagunas de estabilización en el estado de Sonora con información relevante que permite realizar los cálculos mencionados (CONAGUA, 2019). El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero contiene las estimaciones de las magnitudes de las emisiones antropogénicas de gases y compuestos de efecto invernadero; las estimaciones son elaboradas por el instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático como parte de los compromisos asumidos por México ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC); el inventario incluye las emisiones de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y carbono negro; para el cálculo de emisiones de metano se utilizan las directrices del IPCC de 2006 (INECC, 2018).

Para calcular las emisiones de metano se utilizó como base el método de nivel 1 de las directrices del IPCC del 2006, obteniéndose una metodología compuesta que incorpora elementos del método de nivel 1, mediante la utilización de valores predeterminados correspondientes al factor de emisión y los parámetros actividad, y del método nivel 2, que usa la misma metodología, aunque un factor de emisión más específico basado en mediciones de campo del país.

En este caso se utilizaron los factores de emisión de metano recomendados en la tesis doctoral de Paredes (2016), los cuales son más precisos para las lagunas de estabilización en México, toda vez que este factor fue calculado de análisis realizados en lagunas de estabilización mexicanas. A diferencia del factor de emisión general del IPCC, que es general para América Latina y es proporcionado en la metodología nivel 1 del IPCC; para la ejecución del método nivel dos se requiere utilizar datos acerca de la actividad específica del país que no están disponibles, por lo cual se recurrió a los valores de defecto proporcionados para América latina. En consecuencia, la metodología resultante incorpora elementos de las de nivel 1 y 2; sin embargo, como se mencionó anteriormente, también se obtendrán los valores de las emisiones mediante la metodología nivel 1 por si sola con propósitos comparativos.

Los pasos para calcular la magnitud de las emisiones de metano de aguas residuales domesticas según el método IPCC son:

Estimación del contenido total de carbono orgánico degradable en las aguas residuales domesticas mediante la ecuación 1:

$$TOW = P \cdot DBO \cdot 0.001 \cdot I \cdot 365 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde “TOW” denota el total de materia orgánica en las aguas residuales durante el año del inventario en kg de DBO/año; “P” indica el valor al que asciende la población del país durante el año del inventario expresado como número de personas; el parámetro DBO alude al DBO per cápita específico del país en el año del inventario en g/persona/día (Tabla 1); el factor de conversión “0.001” transforma los gramos de DBO a kilogramos; y, finalmente, “I” es un factor de corrección que permite considerar el DBO industrial adicional eliminado en las cloacas (si es recolectado, el valor predeterminado es 1.2; si no lo es, su valor es 1.00).

Tabla 1. Valores de DBO₅ estimados para las aguas residuales domésticas por regiones y países seleccionados.* Carga orgánica específica (DBO₅) Q /P

País/Región	(DBO ₅ Q) / P, g/día*persona
África	37

Egipto	34
Asia, Oriente Medio, America Latina	40
India	34
Cisjordania y Franja de Gaza (Palestina)	50
Japón	42
Brasil	50
Canada, Europa, Rusia, Oceanía	60
Dinamarca	62
Alemania	62
Grecia	57
Itali	60
Suecia	75
Turquía	38
Estados Unidos	85

Fuente: IPCC (2006)

Posteriormente, se utiliza la ecuación 2 para obtener el factor de emisión de cada sistema de tratamiento y/o eliminación de aguas residuales domésticas, y que permite calcular la cantidad máxima de metano que puede generarse a partir de una cantidad dada de sustancias orgánicas contenidas en las aguas.

$$EF_j = B_0 \cdot MCF_j \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde “EF_j” designa al factor de emisión en kg de CH₄/kg de DBO; “J” denota a cada una de las vías o sistemas de tratamiento y/o eliminación; “B₀” se corresponde con la capacidad máxima de producción de metano y se expresa en kg de CH₄/kg de DBO; MCF_j es un factor de corrección de la producción el metano, su valor es fraccionario (Tabla 2).

Tabla 2. Valores de MCF por defecto para las aguas residuales domésticas.

Tipo de vía o sistema de tratamiento y eliminación	Comentarios	MCF	Intervalo
Sistema sin tratamiento			
Eliminación en río, lago y mar	Los ríos con alto contenido de sustancias orgánicas pueden volverse anaeróbicos.	0,1	0 – 0,2
Cloaca estancada	Abierta y caliente	0,5	0,4 – 0,8
Cloaca en movimiento (abierta o cerrada)	Correntosa, limpia (cantidades insignificantes de CH ₄ desde las estaciones de bombeo)	0	0
Sistema tratado			
Planta de tratamiento centralizado aeróbico	Debe ser bien operada.	0	0 – 0,1
Planta de tratamiento centralizado aeróbico	Mal operada. Sobrecargada	0,3	0,2 – 0,4
Digestor anaeróbico para lodos	Aquí no se considera la recuperación de CH ₄	0,8	0,8 – 1,0
Reactor anaeróbico	Aquí no se considera la recuperación de CH ₄	0,8	0,8 – 1,0
Laguna anaeróbica poco profunda	Profundidad de menos de 2 metros: recurrir al dictamen de expertos.	0,2	0 – 0,3
Laguna anaeróbica profunda	Profundidad de más de 2 metros	0,8	0,8 – 1,0
Sistema séptico	La mitad del DBO se decanta en taques anaerobicos	0,5	0,5
Letrina	Clima seco, capa freatica mas baja que la letrina, familia reducida (3-5 personas)	0,1	0,05 – 0,15
Letrina	Clima seco, capa freática más baja que la letrina, uso comunitario	0,5	0,4 – 0,6
Letrina	Clima húmedo/ descarga por agua, capa freática más alta que la letrina	0,7	0,7 – 1,0
Letrina	Extracción frecuente de sedimentos para abono	0,1	0,1

Fuente: IPCC (2006)

A continuación, se procedió a calcular las emisiones utilizando los factores de emisión para lagunas de estabilización de Paredes 2016. Estos factores se obtuvieron con la función de densidad de probabilidad, la cual describe la probabilidad relativa según la cual una variable aleatoria tomará determinado valor, con un intervalo de confianza del 95% .El factor de emisión recomendado para lagunas de estabilización que aplican buenas prácticas en México es 0.45 kg CH₄/ kg DBO y el factor de emisión recomendado para lagunas de estabilización con prácticas inadecuadas o pobres es 0.60 kg CH₄/ kg DBO (Paredes, 2016).

Finalmente, para estimar las emisiones de metano procedentes de aguas residuales domésticas, se utilizó la ecuación 3, y a la cual es necesario realizar ajustes para considerar la separación de lodos y/o recuperaciones de metano. Los resultados correspondientes a cada sistema se suman.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [\sum (U_i \cdot T_{ij} \cdot EF_j)] (\text{TOW-S}) \cdot R \quad (\text{Ec. 3}).$$

Donde:

“Emisiones de CH₄” denota el monto de emisiones de CH₄ durante el año del inventario, en kg de CH₄ / año; “TOW” se refiere al total de materia orgánica en las aguas residuales en el año del inventario expresada como kg de DBO/ año; “S” designa la cantidad de componente orgánico separado como lodo durante el año del inventario en kg de DBO/año; “U_i” es la fracción de la población de acuerdo al grado de urbanización y grupo de ingresos “i” en el año de inventario (Tabla 3); “T_{ij}” es el grado de utilización de la vía o

sistema de tratamiento y/o eliminación “j” para cada fracción de grupo de ingresos “i” en el año del inventario (Tabla 3); “I” se refiere al grupo de ingresos, a saber, rural, urbano de altos ingresos y urbano de bajos ingresos; “J” designa a la vía o sistema de tratamiento/eliminación; “EF_j” corresponde al factor de emisión en kg de CH₄ /kg de DBO, y, finalmente, “R” es la cantidad de metano recuperada durante el año del inventario en kg de CH₄/año.

Tabla 3. Valores sugeridos para la fracción de la población (U) y el grado de utilización de la vía del tratamiento o eliminación o del método por grupo de ingresos (T_{ij}) para los países seleccionados.

País	Urbanización (U) ¹			Grado de utilización de la vía del tratamiento o eliminación o del método por cada grupo de ingresos (T _{ij}) ³														
	Fracción de la población			U=Rural					U=urbana de ingresos altos					U=urbana de ingresos bajos				
	Rural	urbana	urbana-	Pozo séptico	Letrina	Otro	Cloaca ⁴	Ninguno	Pozo séptico	Letrina	Otro	Cloaca ⁴	Ninguno	Pozo séptico	Letrina	Otro	Cloaca ⁴	Ninguno
África		alta ²	baja ²															
Nigeria	0,56	0,32	0,31	0,00	0,37	0,00	1,17	0,24	0,05	0,34	0,20	0,56	0,32	0,31	0,00	0,37	0,00	0,17
Egipto	0,56	0,15	0,05	0,10	0,70	0,00	1,17	0,24	0,05	0,34	0,20	0,56	0,15	0,05	0,10	0,70	0,00	0,17
Kenia	0,56	0,32	0,31	0,00	0,37	0,00	1,17	0,24	0,05	0,34	0,20	0,56	0,32	0,31	0,00	0,37	0,00	0,17
Sudáfrica	0,48	0,15	0,15	0,00	0,70	0,00	1,17	0,24	0,05	0,34	0,20	0,48	0,15	0,15	0,00	0,70	0,00	0,17
Asia																		
China	0,3	0,18	0,08	0,07	0,67	0,00	0,14	0,10	0,03	0,68	0,05	0,3	0,18	0,08	0,07	0,67	0,00	0,14
India	0,33	0,18	0,08	0,07	0,67	0,00	0,14	0,10	0,03	0,53	0,20	0,33	0,18	0,08	0,07	0,67	0,00	0,14
Indonesia	0,43	0,18	0,08	0,00	0,74	0,00	0,14	0,10	0,03	0,53	0,20	0,43	0,18	0,08	0,00	0,74	0,00	0,14
Paquistán	0,43	0,18	0,08	0,00	0,74	0,00	0,14	0,10	0,03	0,53	0,20	0,43	0,18	0,08	0,00	0,74	0,00	0,14
Bangla Desh	0,43	0,18	0,08	0,00	0,74	0,00	0,14	0,10	0,03	0,53	0,20	0,43	0,18	0,08	0,00	0,74	0,00	0,14
Japón	0,00	0,00	0,00	0,10	0,90	0,00	0,10	0	0	0,90	0	0,00	0,00	0,00	0,10	0,90	0,00	0,10
Europa																		
Rusia	0,00	0,10	0,00	0,00	0,90	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,10	0,00	0,00	0,90	0,00	ND
Alemania	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND
Reino Unido	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	ND
Francia	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	ND
Italia	0,00	0,04	0,00	0,00	0,96	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,04	0,00	0,00	0,96	0,00	ND
América del Norte																		
Estados Unidos	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND
Canadá	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND
América Latina y el Caribe																		
Brasil	0,45	0,00	0,20	0,00	0,80	0,00	0,00	0,40	0,00	0,40	0,20	0,45	0,00	0,20	0,00	0,80	0,00	0,00
México	0,45	0,00	0,20	0,00	0,80	0,00	0,00	0,40	0,00	0,40	0,20	0,45	0,00	0,20	0,00	0,80	0,00	0,00
Ocenía																		
Australia y Nueva Zelanda	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND	ND	ND	ND	ND	0,00	0,05	0,00	0,00	0,95	0,00	ND

Notas: (ND= dato no disponible)

1. Urbanization projections for 2005 (Proyecciones de urbanización para el 2005) (Naciones Unidas, 2002).

2. División sugerida entre ingresos altos urbanos y bajos ingresos urbanos. Se alienta a los países a utilizar sus propios datos o mejores apreciaciones

3. Valores de T_{ij} basados en dictamen de expertos, (Doorn y Liles, 1999).

4. Las cloacas pueden ser abiertas o cerradas (alcantarillados), lo cual determinará la elección de MCF, véase Tabla 1.

5. Destatis, 2001.

Nota: Estos datos se han tomado de la bibliografía o están basados en dictamen de expertos. Por favor use valores nacionales si los hay.

Por último, se obtuvieron las áreas de las lagunas de estabilización de Sonora mediante un listado de éstas presentadas en un archivo con extensión KMZ otorgado por la Comisión Nacional del Agua con los cuales fue posible obtener los flujos por unidad de área de cada laguna.

Alcance

El estudio comprende las lagunas de estabilización municipales ubicadas en el estado de Sonora.

Pregunta de investigación

¿Cuál es la contribución de las lagunas de estabilización municipales ubicadas en el estado de Sonora a la generación de gases de efecto invernadero?

Objeto de estudio

Cuantificación de las emisiones de metano provenientes de las lagunas de estabilización del estado de Sonora.

Selección y tamaño de muestra

Se utilizaron parámetros correspondientes a las 93 lagunas de estabilización del estado de Sonora.

Instrumentos de recolección y manejo de datos

Los valores correspondientes a los parámetros utilizados para estimar las magnitudes de las emisiones de metano fueron proporcionados por la Comisión Nacional del Agua en hojas de cálculo de Microsoft Excel y los datos fueron analizados utilizando el mismo programa.

Además, también dicha institución proveyó un listado de las lagunas de estabilización en el estado de Sonora en formato de archivo con extensión KMZ para abrir y utilizar en Google Earth, mediante el cual fue posible obtener las áreas de las lagunas.

VI. RESULTADOS

A continuación, con fines meramente ilustrativos, se presentan la secuencia de cálculos y desarrollos matemáticos realizados para la estimación de las emisiones de la laguna de estabilización de Aconchi. Se estimó el contenido total de carbón orgánico degradable (TOW) con la Ecuación 1, multiplicando los habitantes de Aconchi por el DBO estimado y sugerido para las aguas residuales de Asia, Oriente Medio y América Latina (Tabla 1), el cual es 40 g por día por persona – que se multiplica por 0.001 para convertir de gramos de BOD a kilogramos –. Este valor se multiplica por 1, que es el factor de corrección que permite considerar el DBO industrial adicional eliminado a través de cloacas y que no es recolectado; en caso contrario, el valor predeterminado es de 1.2. Esto nos dio como resultado 26718 kg de DBO al año para la PTAR de Aconchi

$$TOW = P \cdot BOD \cdot 0.001 \cdot I \cdot 365 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\begin{aligned} TOW &= (1830 \text{ habitantes}) (40 \text{ g DBO/día} \cdot \text{persona}) (0.001 \text{ kg/g}) (1) (365 \text{ días/año}) \\ &= 26718 \text{ kg DBO/año} \end{aligned}$$

Posteriormente se utilizó la ecuación 2 para obtener el factor de emisión. En ella, el parámetro B_0 corresponde a la capacidad máxima de producción de metano y al cual se le asignó un valor de 0.6 kg de CH_4 /kg de DBO; un valor establecido por defecto para las aguas residuales domésticas. El parámetro B_0 se multiplica por el factor de corrección MCF_j , empleando el valor recomendado de 0.2 para lagunas anaeróbicas poco profundas (Tabla 2). Alternativamente, se utilizó el factor de emisión calculado y recomendado por Paredes (2016) para la estimación las emisiones y estar en posibilidad de comparar los resultados obtenidos mediante ambos procedimientos.

$$EF_j = B_0 \cdot \text{MCF}_j \quad (\text{Ec. 2})$$

Metodología Nivel 1

$$EF_j = (0.6 \text{ kg CH}_4/\text{kg de DBO}) (0.2)$$

$$EF_j = 0.12 \text{ kg de CH}_4/\text{kg de DBO}$$

Metodología compuesta

$$EF_j = 0.6 \text{ kg de CH}_4/\text{kg de DBO}$$

Se utilizó un factor de emisión de 0.12 kg de CH₄/kg de BOD al aplicar la metodología Nivel 1 para la estimación de la magnitud emisiones de metano y uno de 0.6 kg de CH₄/kg de BOD al utilizar la metodología compuesta, el cual es el factor recomendado para las lagunas de estabilización que tienen malas prácticas. Lo anterior debido a que en la información proporcionada por CONAGUA, la laguna en cuestión rebasó su capacidad instalada. Para aquellas lagunas que se consideró mantenían “buenas prácticas” en su operación, se utilizó el factor de 0.45 kg de CH₄/kg de DBO

Por último, se procedió a calcular la magnitud de las emisiones de metano mediante ambos procedimientos utilizando la ecuación 3.

Multiplicando “U” tomándola como 1 ya que en vez de tomar una fracción de la población utilizando la Tabla 3, en donde se recomienda el porcentaje para la Población Rural en México, se tomó a los habitantes beneficiados como el total de nuestra población al calcular la TOW.

Al parámetro que hace referencia al grado de utilización de este tratamiento, “T_{ij}”, para esta localidad en particular se le asignó un valor de 1, ya que es la única metodología de tratamiento disponible en Aconchi. El valor del factor de emisión, “EF_j”, corresponde a los previamente calculados utilizando la metodología Nivel 1 o el factor recomendado por Paredes 2016. Finalmente el resultado se obtuvo utilizando el valor de TOW previamente determinado.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [\sum (U_i \cdot T_{ij} \cdot EF_j)] (TOW-S) - R \quad (\text{Ec. 3}).$$

Metodología Nivel 1b

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [\sum (0.45 \cdot 1 \cdot 0.12 \text{ kg de CH}_4/\text{kg de DBO})] (26718 \text{ kg DBO/ año})$$

$$\text{Emisiones de CH}_4 = 14,42.772 \text{ Kg de CH}_4 / \text{año}$$

Metodología compuesta

Emisiones de CH₄ = [Σ (0.45 · 1· 0.6 kg de CH₄/kg de DBO)] (26718 kg DBO al año

Emisiones de CH₄ = 7,213.86 Kg de CH₄ por año

Estos cálculos fueron los que se hicieron con cada laguna de estabilización, estimando los Kg de metano que se emiten al año con cada una de las metodologías.

A continuación, en la Tabla 4, se muestran los valores correspondientes a cada una de las lagunas de estabilización en el estado de Sonora obtenidos al seguir los pasos del método nivel 1 y de la metodología compuesta. En la Tabla 5 se muestra el flujo por unidad de área al año en cada laguna.

Tabla 4. Emisiones de metano obtenidos con metodología Nivel 1 y metodología compuesta Nivel 1 y 2.

Nombre de la PTAR	TOW (kg de DBO por año)	Metodologia Nivel 1		Metodología compuesta	
		Factor de emisión kg de CH ₄ /kg de DBO	Emisiones de CH ₄ (Kg de CH ₄ por año)	Factores de emisión kg CH ₄ /kg DBO	Emisiones de CH ₄ (Kg de CH ₄ por año)
PTAR Aconchi	26,718	0.12	3206.16	0.6	16030.8
PTAR La Estancia	12,527	0.12	1503.216	0.6	7516.08
PTAR Agua Prieta	1,407,148	0.12	168857.76	0.6	844288.8
PTAR Álamos	156,410	0.12	18769.176	0.45	70384.41
PTAR Altar	152,497	0.12	18299.64	0.45	68623.65
PTAR Llano Blanco	7,315	0.12	877.752	0.45	3291.57
PTAR Arivechi	9,475	0.12	1137.048	0.6	5685.24
PTAR Arizpe	24,776	0.12	2973.144	0.6	14865.72
PTAR Sinoquipe	4,570	0.12	548.376	0.6	2741.88
PTAR Atil	7,869	0.12	944.328	0.6	4721.64
PTAR Bacanora	7,723	0.12	926.808	0.6	4634.04
PTAR Bacerac	17,111	0.12	2053.344	0.45	7700.04

PTAR Bacadehuachi	17,228	0.12	2067.36	0.45	7752.6
PTAR Bacoachi	14,787	0.12	1774.4256	0.6	8872.128
PTAR Banamichi	20,177	0.12	2421.264	0.45	9079.74
PTAR La Mora	3,300	0.12	395.952	0.6	1979.76
PTAR Las Delicias	2,365	0.12	283.824	0.6	1419.12
PTAR Baviacora	26,543	0.12	3185.136	0.6	15925.68
PTAR Bavispe	10,059	0.12	1207.128	0.45	4526.73
PTAR Benjamin Hill	69,905	0.12	8388.576	0.45	31457.16
PTAR Caborca	1,031,563	0.12	123787.56	0.6	618937.8
PTAR Francisco I. Madero (Campo 30)	21,082	0.12	2529.888	0.45	9487.08
PTAR Marte R. Gomez (Tobarito)	127,020	0.12	15242.4	0.45	57159
PTAR Pueblo Yaqui	207,816	0.12	24937.968	0.45	93517.38
PTAR Quetchehueca	43,815	0.12	5257.752	0.45	19716.57
PTAR Cananea	474,953	0.12	56994.312	0.45	213728.67
PTAR Carbo	70,547	0.12	8465.664	0.6	42328.32
PTAR La Colorada	2,862	0.12	343.392	0.6	1716.96
PTAR Cobachi	2,613	0.12	313.608	0.45	1176.03
PTAR Tecoripa	7,037	0.12	844.464	0.45	3166.74
PTAR Cucurpe	10,191	0.12	1222.896	0.6	6114.48
PTAR Cumpas	46,589	0.12	5590.632	0.6	27953.16
PTAR Jécori	8,351	0.12	1002.144	0.6	5010.72
PTAR Divisaderos	11,870	0.12	1424.376	0.6	7121.88
PTAR Empalme	678,199	0.12	81383.904	0.6	406919.52
PTAR La Atravezada	34,704	0.12	4164.504	0.45	15616.89
PTAR Fronteras	11,724	0.12	1406.856	0.45	5275.71
PTAR Esqueda	113,632	0.12	13635.816	0.45	51134.31
PTAR Cucuiarachic	672	0.12	80.592	0.45	302.22
PTAR Turicachi	8,629	0.12	1035.432	0.45	3882.87
PTAR La Salada	1,885,459	0.12	226255.032	0.45	848456.37
PTAR Norte	0	0.12	0	0.45	0

Planta Buenos Aires	0	0.12	0	0.6	0
PTAR San Carlos	49,859	0.12	5983.08	0.45	22436.55
PTAR Granados	15,841	0.12	1900.92	0.45	7128.45
PTAR Miguel Aleman	599,023	0.12	71882.808	0.6	359414.04
PTAR San Francisco de Batuc	3,460	0.12	415.224	0.6	2076.12
PTAR Huachinera	17,126	0.12	2055.096	0.6	10275.48
PTAR Huasabas	13,753	0.12	1650.384	0.6	8251.92
PTAR Huatabampo	454,221	0.12	54506.472	0.6	272532.36
PTAR Jupare	16,133	0.12	1935.96	0.6	9679.8
PTAR Huepac	9,811	0.12	1177.344	0.6	5886.72
PTAR Ojo de Agua	5,928	0.12	711.312	0.45	2667.42
PTAR Ranchito de Huepac	2,336	0.12	280.32	0.45	1051.2
PTAR Imuris	116,479	0.12	13977.456	0.6	69887.28
PTAR Magdalena	460,645	0.12	55277.352	0.45	207290.07
PTAR Mazatan	16,337	0.12	1960.488	0.45	7351.83
PTAR Moctezuma	71,014	0.12	8521.728	0.45	31956.48
PTAR Naco (Este)	107,354	0.12	12882.456	0.6	64412.28
PTAR Naco (Oste)	0	0.12	0	0.45	0
PTAR Nacozari	172,149	0.12	20657.832	0.45	77466.87
PTAR Nacori Chico	14,133	0.12	1695.936	0.6	8479.68
PTAR Pueblo Mayo	35,361	0.12	4243.344	0.45	15912.54
PTAR Onavas	4,511	0.12	541.368	0.45	2030.13
PTAR Opodepe	4,993	0.12	599.184	0.6	2995.92
PTAR Puerto Peñasco	1,451,897	0.12	174227.64	0.45	653353.65
PTAR Nueva Sonoyta	253,076	0.12	30369.168	0.45	113884.38
PTAR	0	0.12	0	0.45	0
PTAR Quiriego	16,542	0.12	1985.016	0.6	9925.08
PTAR Rayon	21,725	0.12	2606.976	0.6	13034.88
PTAR San Felipe de Jesus	5,752	0.12	690.288	0.6	3451.44
PTAR San Ignacio Río	126,188	0.12	15142.536	0.6	75712.68

Muerto					
PTAR Sahuaripa	62,284	0.12	7474.032	0.6	37370.16
PTAR La Mesita del Cuajari	1,635	0.12	196.224	0.6	981.12
PTAR San Luis Río Colorado	2,818,165	0.12	338179.8	0.45	1268174.25
PTAR San Pedro de La Cueva	15,213	0.12	1825.584	0.45	6845.94
PTAR Fabrica de Los Angeles	2,847	0.12	341.64	0.45	1281.15
PTAR Santa Ana	207,846	0.12	24941.472	0.45	93530.52
PTAR Estacion Llano	25,813	0.12	3097.536	0.45	11615.76
PTAR Santa Cruz	17,053	0.12	2046.336	0.45	7673.76
PTAR Saric	15,768	0.12	1892.16	0.6	9460.8
PTAR Sásabe	24,148	0.12	2897.808	0.45	10866.78
PTAR Soyopa	1,343	0.12	161.184	0.45	604.44
PTAR Suaqui Grande	15,053	0.12	1806.312	0.6	9031.56
PTAR Tepache	17,476	0.12	2097.144	0.6	10485.72
PTAR Trincheras	19,506	0.12	2340.672	0.45	8777.52
PTAR Tubutama	5,022	0.12	602.688	0.45	2260.08
PTAR Ures	56,035	0.12	6724.176	0.6	33620.88
PTAR Guadalupe de Ures	14,016	0.12	1681.92	0.6	8409.6
PTAR Pueblo de Alamos	6,789	0.12	814.68	0.6	4073.4
PTAR Santiago	3,679	0.12	441.504	0.6	2207.52
PTAR Villa Hidalgo	18,031	0.12	2163.72	0.6	10818.6
PTAR Villa Pesqueira	7,548	0.12	905.784	0.6	4528.92
PTAR Yecora	48,545	0.12	5825.4	0.6	29127
Suma (Kg de CH ₄ por año)			1,712,075.07		7,200,510.19

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. Flujos por unidad de área y emisiones de metano obtenidos con metodología Nivel 1 y metodología compuesta Nivel 1 y 2.

Nombre de la PTAR	AREA (Ha)	Metodología Nivel 1		Metodología compuesta	
		Emisiones de CH ₄ (Kg de CH ₄ por año)	Flujo por unidad de area (kg de CH ₄ /Ha) al año	Flujo por unidad de area (kg de CH ₄ /Ha) al año	Emisiones de CH ₄ (Kg de CH ₄ por año)
PTAR Aconchi	0.874	3206.16	3668.375286	18341.87643	16030.8
PTAR La Estancia	0.115	1503.216	13071.44348	65357.21739	7516.08
PTAR Agua Prieta	9.83	168857.76	17177.79858	85888.99288	844288.8
PTAR Álamos	2.99	18769.176	6277.316388	23539.93645	70384.41
PTAR Altar	1.676	18299.64	10918.63962	40944.89857	68623.65
PTAR Llano Blanco	0.68	877.752	1290.811765	4840.544118	3291.57
PTAR Arivechi	0.49	1137.048	2320.506122	11602.53061	5685.24
PTAR Arizpe	0.41	2973.144	7251.570732	36257.85366	14865.72
PTAR Sinoquipe		548.376			2741.88
PTAR Atil	0.27	944.328	3497.511111	17487.55556	4721.64
PTAR Bacanora	0.31	926.808	2989.703226	14948.51613	4634.04
PTAR Bacerac	0.35	2053.344	5866.697143	22000.11429	7700.04
PTAR Bacadehuachi	0.48	2067.36	4307	16151.25	7752.6
PTAR Bacoachi	0.24	1774.4256	7393.44	36967.2	8872.128
PTAR Banamichi	1.01	2421.264	2397.291089	8989.841584	9079.74
PTAR La Mora	0.205	395.952	1931.473171	9657.365854	1979.76
PTAR Las Delicias	0.72	283.824	394.2	1971	1419.12
PTAR Baviacora	0.52	3185.136	6125.261538	30626.30769	15925.68
PTAR Bavispe		1207.128			4526.73
PTAR Benjamin Hill	1.47	8388.576	5706.514286	21399.42857	31457.16
PTAR Caborca		123787.56			618937.8
PTAR Francisco I. Madero (Campo 30)	0.56	2529.888	4517.657143	16941.21429	9487.08
PTAR Marte R. Gomez (Tobarito)	1.79	15242.4	8515.307263	31932.40223	57159
PTAR Pueblo Yaqui	4.38	24937.968	5693.6	21351	93517.38
PTAR Quetchehuca	1.16	5257.752	4532.544828	16997.0431	19716.57
PTAR Cananea	5.98	56994.312	9530.821405	35740.58027	213728.67
PTAR Carbo	1.44	8465.664	5878.933333	29394.66667	42328.32

PTAR La Colorada	0.13	343.392	2641.476923	13207.38462	1716.96
PTAR Cobachi	0.14	313.608	2240.057143	8400.214286	1176.03
PTAR Tecoripa	0.34	844.464	2483.717647	9313.941176	3166.74
PTAR Cucurpe	0.55	1222.896	2223.447273	11117.23636	6114.48
PTAR Cumpas	1.05	5590.632	5324.411429	26622.05714	27953.16
PTAR Jécori	0.2	1002.144	5010.72	25053.6	5010.72
PTAR Divisaderos	0.44	1424.376	3237.218182	16186.09091	7121.88
PTAR Empalme	1.06	81383.904	76777.26792	383886.3396	406919.52
PTAR La Atravezada	0.14	4164.504	29746.45714	111549.2143	15616.89
PTAR Fronteras	0.83	1406.856	1695.007229	6356.277108	5275.71
PTAR Esqueda	2.29	13635.816	5954.504803	22329.39301	51134.31
PTAR Cucuiarachic		80.592			302.22
PTAR Turicachi	0.5	1035.432	2070.864	7765.74	3882.87
PTAR La Salada	19.95	226255.032	11341.10436	42529.14135	848456.37
PTAR Norte	1.64	0	0	0	0
Planta Buenos Aires		0			0
PTAR San Carlos	2.09	5983.08	2862.717703	10735.19139	22436.55
PTAR Granados	0.56	1900.92	3394.5	12729.375	7128.45
PTAR Miguel Aleman		71882.808			359414.04
PTAR San Francisco de Batuc	0.04	415.224	10380.6	51903	2076.12
PTAR Huachinera	0.12	2055.096	17125.8	85629	10275.48
PTAR Huasabas	0.6	1650.384	2750.64	13753.2	8251.92
PTAR Huatabampo	1.38	54506.472	39497.44348	197487.2174	272532.36
PTAR Jupare		1935.96			9679.8
PTAR Huepac	0.56	1177.344	2102.4	10512	5886.72
PTAR Ojo de Agua	0.084	711.312	8468	31755	2667.42
PTAR Ranchito de Huepac	0.226	280.32	1240.353982	4651.327434	1051.2
PTAR Imuris		13977.456			69887.28
PTAR Magdalena	1.44	55277.352	38387.05	143951.4375	207290.07
PTAR Mazatan	0.37	1960.488	5298.616216	19869.81081	7351.83
PTAR Moctezuma	0.084	8521.728	101449.1429	380434.2857	31956.48

PTAR Naco (Este)	5.31	12882.456	2426.074576	12130.37288	64412.28
PTAR Naco (Oste)		0			0
PTAR Nacozari	2.12	20657.832	9744.260377	36540.97642	77466.87
PTAR Nacori Chico	0.54	1695.936	3140.622222	15703.11111	8479.68
PTAR Pueblo Mayo	0.46	4243.344	9224.66087	34592.47826	15912.54
PTAR Onavas		541.368			2030.13
PTAR Opodepe	0.35	599.184	1711.954286	8559.771429	2995.92
PTAR Puerto Peñasco	40.38	174227.64	4314.701337	16180.13001	653353.65
PTAR Nueva Sonoyta	2.63	30369.168	11547.21217	43302.04563	113884.38
PTAR		0			0
PTAR Quiriego	0.29	1985.016	6844.882759	34224.41379	9925.08
PTAR Rayon	1.5	2606.976	1737.984	8689.92	13034.88
PTAR San Felipe de Jesus	1.62	690.288	426.1037037	2130.518519	3451.44
PTAR San Ignacio Río Muerto		15142.536			75712.68
PTAR Sahuaripa	3.42	7474.032	2185.389474	10926.94737	37370.16
PTAR La Mesita del Cuajari	0.16	196.224	1226.4	6132	981.12
PTAR San Luis Río Colorado	84.17	338179.8	4017.8187	15066.82013	1268174.25
PTAR San Pedro de La Cueva		1825.584			6845.94
PTAR Fabrica de Los Angeles	0.11	341.64	3105.818182	11646.81818	1281.15
PTAR Santa Ana		24941.472			93530.52
PTAR Estacion Llano	0.51	3097.536	6073.6	22776	11615.76
PTAR Santa Cruz	0.57	2046.336	3590.063158	13462.73684	7673.76
PTAR Saric	1.16	1892.16	1631.172414	8155.862069	9460.8
PTAR Sásabe	0.49	2897.808	5913.893878	22177.10204	10866.78
PTAR Soyopa		161.184			604.44
PTAR Suaqui Grande	0.45	1806.312	4014.026667	20070.13333	9031.56
PTAR Tepache	0.95	2097.144	2207.52	11037.6	10485.72
PTAR Trincheras	0.42	2340.672	5573.028571	20898.85714	8777.52
PTAR Tubutama		602.688			2260.08

PTAR Ures		6724.176			33620.88
PTAR Guadalupe de Ures	0.74	1681.92	2272.864865	11364.32432	8409.6
PTAR Pueblo de Alamos		814.68			4073.4
PTAR Santiago	0.17	441.504	2597.082353	12985.41176	2207.52
PTAR Villa Hidalgo	0.95	2163.72	2277.6	11388	10818.6
PTAR Villa Pesqueira		905.784			4528.92
PTAR Yecora	0.8	5825.4	7281.75	36408.75	29127

Fuente: Elaboración Propia

VII. DISCUSIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un factor necesario y muy importante para el logro del desarrollo sustentable de las comunidades; sin embargo, es evidente que aún los procesos más sencillos, como lo son las lagunas de estabilización, se producen impactos ambientales adversos en el entorno debido a las emisiones de metano (INECC y SEMARNAT, 2015). La suma total estimada de las emisiones de metano de las lagunas usando el método nivel 1 del IPCC arrojó 1,712,075.07 kg de metano al año y con el método compuesto donde se utilizó el factor de emisión más específico obtuvimos 7,200,510.19 kg de metano al año; lo cual arroja una diferencia considerable.

Al calcular la magnitud de las emisiones de metano, utilizando el factor de emisión que recomienda la IPCC, se subestiman los valores reales, ya que las emisiones de metano calculadas con el factor de emisión de Paredes 2016, en general, arrojan valores más elevados, esto es debido la gran diferencia entre el factor de emisión de Paredes 2016 (0.45 y 0.60) al recomendado por el IPCC 2006 para América Latina (0.05) ésta es la principal razón por la cual la diferencia es tan grande. En un estudio desarrollado en el Líbano se concluye que al usar el método IPCC para calcular las emisiones de metano de plantas de tratamiento municipales se subestima su magnitud, en comparación con los resultados obtenidos usando otros métodos (El-Fadel y Massoud, 2001). También existen estudios de estimaciones de metano en México para el sector ganadero, en donde encuentran que en los inventarios de GEI las emisiones de metano son subestimadas con

la metodología IPCC nivel uno (nivel 1: 73 kg CH₄ año por animal contra 116 kg CH₄ año por animal) (Castelán-Ortega et al., 2014; Rendón-Huerta et al., 2014).

De acuerdo a estudios en México donde calcularon las emisiones de CH₄ de vacas de alta producción, alimentadas con granos y forraje de alta calidad estas tienen una emisión de 116 kg de CH₄ por año. (Castelán-Ortega et al., 2014). Por lo que al hacer una comparación la magnitud de las emisiones de las lagunas en Sonora equivalen a 62,072.36 cabezas de ganado. En Sonora para el 2020 se contaban con 714,818 vacas, sin contar con toros, novillos, y becerros (OIAPES y SAGARPHA, 2020) por lo que nuestra estimación equivaldría a aproximadamente al 8.86% de nuestras emisiones por ganadería, lo cual no es una cantidad tan desestimable.

Se sabe que en México en el 2015 se emitieron un total de 683 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e) en forma de gases de efecto invernadero y de este total el 21% corresponden a emisiones de metano (INECC y Semarnat, 2015). Por lo tanto, del total de emisiones, 143.43 millones de toneladas corresponden al metano, siendo la aportación correspondiente a Sonora en este rubro de 7,200.51 toneladas de CH₄ que transformadas a CO₂ equivalente son 198,430 toneladas, lo cual equivale a 76,676.3 litros de gasolina consumidos; estas emisiones podrían ser compensadas por 61,229 toneladas de residuos reciclados en vez de ser eliminados en vertederos (EPA, 2021).

En total, las emisiones anuales de metano de las lagunas de estabilización en Sonora ascienden a 7,200,510.19 kg. Este valor podría potencialmente disminuir a 6,420,281.53 Kg al año si dichas lagunas se mantuvieran en buen estado. Cabe mencionar que esta última magnitud se obtuvo sustituyendo el factor de emisión de 0.60, correspondiente a “malas prácticas” por el de 0.45, empleado en el caso en que aplican “buenas prácticas” al calcular las emisiones. Se entiende como buenas practicas respetar los flujos de las lagunas, desazolvar lodos de las entradas, cortar vegetación que crece en la laguna y reparar los botdos de las lagunas.

De acuerdo a los valores obtenidos del flujo por unidad de área, la PTAR de Empalme y de Moctezuma son las que arrojan los valores más altos, esto al final es debido al área de la laguna en relación a la cantidad de habitantes. Existe poca información que nos permita comparar nuestros valores finales de emisión de metano de una manera directa con otros

trabajos similares, ya que no se dispone de este tipo de datos en el país; sin embargo, los resultados obtenidos son de relevancia para el estado, toda vez que pueden ser comparados incluso con los de otros tipos de tratamiento.

VIII. CONCLUSIONES

Las emisiones anuales de metano de las lagunas de estabilización en Sonora ascienden a 7,200,510.19 kg. Sonora aporta con 198, 430 toneladas de CO₂e con sus lagunas de estabilización, lo cual representa el 0.13% de las emisiones de metano de todo el país. Estas emisiones equivalen aproximadamente al 8.86% de las emisiones originadas por la ganadería en un año. Si las lagunas se mantuvieran en un buen estado se podría bajar a 6,420,281.53 kg de metano al año. El método nivel 1 con los valores por defecto sugeridos subestima los valores reales de emisión. De acuerdo a los valores obtenidos del flujo por unidad de área, la PTAR Empalme y PTAR Moctezuma son las que arrojan los valores más altos.

IX. RECOMENDACIONES

Actualmente, existe una gran necesidad de actualizar los sistemas de tratamiento en general (Zhang, et al., 2019). Una mejora de las lagunas implicaría incorporar lagunas de estabilización de diferentes tipos, remodelar la forma de las lagunas, estructurar el tipo de configuración lagunar de acuerdo con la carga de aguas residuales que se necesitan en la zona, y considerar factores como los niveles de temperaturas, pH, luz solar y la presencia de nutrientes y sustancias tóxicas (Menéndez y Pérez, 2007). Aunado a esto, para aprovechar las emisiones de metano se podrían utilizar diferentes metodologías como cubrir las lagunas con carpas para recuperar el gas metano generado, e instalar sistemas de purga y deshidratación de lodos (Conil P., 2000)

X. REFERENCIAS

- Albert, D. 2020. Monte Carlo Uncertainty Propagation with the NIST Uncertainty Machine. *Journal of Chemical Education*. 97 (5) 1491-1494.
- Bo-Feng, C., Jian-Guo, L., Qing-Xian, G., Xiao-Qin, N., Dong, C., Lan-Cui, L., Ying, Z., Zhan-Sheng, Z. 2014. Estimation of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills in China Based on Point Emission Sources. *Clim. Change Res.* 5(2) 81-91
- Burga, J. 2004. Evaluación y rediseño del sistema de estabilización de la Universidad de Piura. Tesis. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.
- Castelán-Ortega, O., Ku-Vera, J., Estrada-Flores, J. 2014. Modeling methane emissions and methane inventories for cattle production systems in Mexico. *Atmosfera*. 27(2). 185-191
- CCAC, 2014. Time to act to reduce short-lived climate pollutants. United Nations Environment Programme.
- CONAGUA. 2018. Estadísticas de Agua en México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. 2019. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación.
- Conil, P. 2000. El aprovechamiento del biogás de las lagunas de estabilización: perfil del proyecto Palmeiras en Tumaco (Colombia). *Revista Palmas*, Vol 21 pp: 237-240.
- Cortés, F., Treviño, A., Tomasini, A. 2017. Dimensionamiento de lagunas de estabilización. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Disksha, G. y Kumar, S. Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Treatment Plants: A case Study of Noida. *Journal of Water Sustainability*, Vol 2. 131-139
- El-Fadel, M. y Massoud, M. 2001. Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution* 114: 177-185
- EPA 2013. Global Mitigation of Non-CO2 Greenhouse Gases: 2010-2030. United States Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs. Washington, DC.
- EPA. 2017. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2015. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC
- EPA. 2021. Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculador-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero> [Consultado el 13 de Junio de 2021]
- González-Valencia, R., Sepulveda-Jauregui, A., Martínez-Cruz, K., Hoyos-Santillan, J. Dedooven, L. Thalaso. F. 2013. Methane emissions from Mexican freshwater bodies: correlations with water pollution. Springer:Hydrobiologia.
- IDEAM .2009. "Inventario Nacional de Fuentes Y Sumideros de Gases Efecto Invernadero. Capítulo 6: Módulo de residuos. Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá, Colombia. 1-30.
- INECC. 2018. Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Disponible en : <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero> [Consultado el 10 de Abril de 2021].
- INECC y Semarnat. 2015. Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. INECC/Semarnat, México.
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors. Hayama, Kanagawa, Japan: Institute for Global Environmental Strategies.
- IPCC. 2019a. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Calvo, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). IPCC, Switzerland.
- IPCC, 2019b. Resumen para responsables de políticas. En: El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres. [P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (eds.)]. En prensa.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press
- IPCC, 2021. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/> > [Consultado: 03 de Febrero de 2020].
- Ishigaki, T., Yamada, M., Nagamori, M., Ono, Y., Inoue, Y. 2005. Estimation of methane emission from whole waste landfill site using correlation between flux and ground temperature. *Environ Geol.* 48: 845-853
- Konnerup D., Koottatep T., Brix H. (2009), Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia, *Ecological Engineering*, 35 , 248-257

- Lim S. et al. (2012) A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet* 380 (9859):2224–2260.
- Mamane, H. y Lester, Y. 2015. Reutilización de Aguas Residuales en México: Caso Sonora. Centro de Investigación de Agua de la Universidad de Tel Aviv.
- Matamoros, V., Rodríguez, Y., Albaigés, J. 2016. A comparative assessment of intensive and extensive wastewater treatment technologies for removing emerging contaminants in small Communities. *Water Research* 88: 777-785. México.
- Mendoza, C. y Jiménez, G. 2017. Relación entre el efecto invernadero y el cambio climático desde la perspectiva del sector agrario. *Revista Facultad de Agronomía*. Vol. 70
- Mohammed, B., González, M., Molina, L. y Castelán, O. 2017. Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. Vol. 8. Núm.4 p. 965-974.
- Molina, L., Gerardo, L. Cruz-Núñez, X., Lei, W., Garcia-Reynoso, A. 2009. Temas emergentes en cambio climático: metano y carbono negro, sus posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación. Instituto Nacional de Ecología. Available at: https://www.researchgate.net/publication/262915533_Temas_emergentes_en_cambio_climatico_metano_y_carbono_negro_sus_posibles_co-beneficios_y_desarrollo_de_planes_de_investigacion#fullTextFileContent [accessed Jan 01 2021].
- Naciones Unidas. 2015. Acuerdo de París. Disponible en: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> >[Consultado: 03 de febrero de 2021].
- Naciones Unidas. 2016. Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe. Santiago, CEPAL
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2018. Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States. Washington, DC: The National Academies Press.
- Noyola, A., Paredes, M. G., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. 2016. Reduction of Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment in Mexico Based on Technology Selection. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 44(9), 1091–1098.
- OIAPES y SAGARPHA. 2020. Censo Ganadero 2020. Gobierno del Estado de Sonora. Disponible en: <http://oiapes.sagarhpa.sonora.gob.mx> [Consultado: 14 de Junio de 2021]
- OMM. 2019. Boletín de la OMM sobre los Gases de Efecto Invernadero: Estado de los gases de efecto invernadero en la atmosfera según las observaciones mundiales realizadas en 2018. Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Mundial de la Salud, UN Water, ONU Habitat. 2018 Progresos en el tratamiento de las aguas residuales: Prueba piloto de la metodología de monitoreo y primeras constataciones sobre el indicador 6.3.1 de los ODS. OMS. Disponible en: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/progress-of-wastewater-treatment/es/ > [Consultado: 18 de Marzo de 2021]
- Paredes, M. G., Güereca, L. P., Molina L.T., Noyola, A. 2015. Methane emissions from stabilization ponds for municipal wastewater treatment in Mexico. *Journal of Integrative Environmental Sciences*.12, Sup 1: 139-153.
- Paredes, M. G. 2016. Estimation of the Ch4 emission factors for the three most representative municipal wastewater treatment processes In Mexico. Tesis Doctoral en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma De México Programa De Maestría Y Doctorado En Ingeniería Ingeniería Ambiental – Aguas Residuales
- Real Academia de Ingeniería. 2021. Diccionario Español de Ingeniería. Disponible en: <http://diccionario.raing.es/es/lema/equivalente-en-di%C3%B3xido-de-carbono> >[Consultado: 03 de Febrero de 2021].
- Rodríguez, J. 2008. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas comunidades. Tesis Licenciatura. Universidad de Sonora. División Ingeniería.
- Rodríguez, J., Paz, F., Watts, C., Lizárraga, C., Yépez, G., Jiménez, G., Castellanos, A., Hinojo C., Eduardo Macías Vázquez. 2019. Mediciones de metano y bióxido de carbono usando la técnica de covarianza de vórtices en ganado lechero semiestabulado en Sonora, Mexico. *Terra Latinoamericana* 37: 69-80
- SEMARNAT. 2018. México busca reducir y aprovechar emisiones de metano. Comunicado de Prensa Núm. 007/18 Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/mexico-buscaexico-busca-reducir-y-aprovechar-emisiones-de-metano> > [Accesado el 18 de marzo de 2021]
- SEMARNAT y CONAGUA. 2016. Lineamientos Técnicos: Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales a Nivel Vivienda en Zona Rural. Programas de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Tratamiento de Aguas residuales.

- Steinmann, C., Weinhart, S., Melzer, A. 2003. A combined system of lagoon and constructed wetland for an effective wastewater treatment. *Water Research* 37: 2035–2042
- Szemesova, J., Gera, M. 2010. Uncertainty analysis for estimation of landfill emissions and data sensitivity for the input variation. *Climatic Change*. 103(1-2):37–54.
- Zhang, X., Zhang, M., Liu, H., Gu, J. Liu, Y. 2019. Environmental sustainability: a pressing challenge to biological sewage treatment processes. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 12: 1-5